

SIMOX用大電流酸素イオン注入装置

—高速・低消費電力LSIを実現するSOI基板の量産を目指して—

High-Current Oxygen Ion Implanter for SIMOX

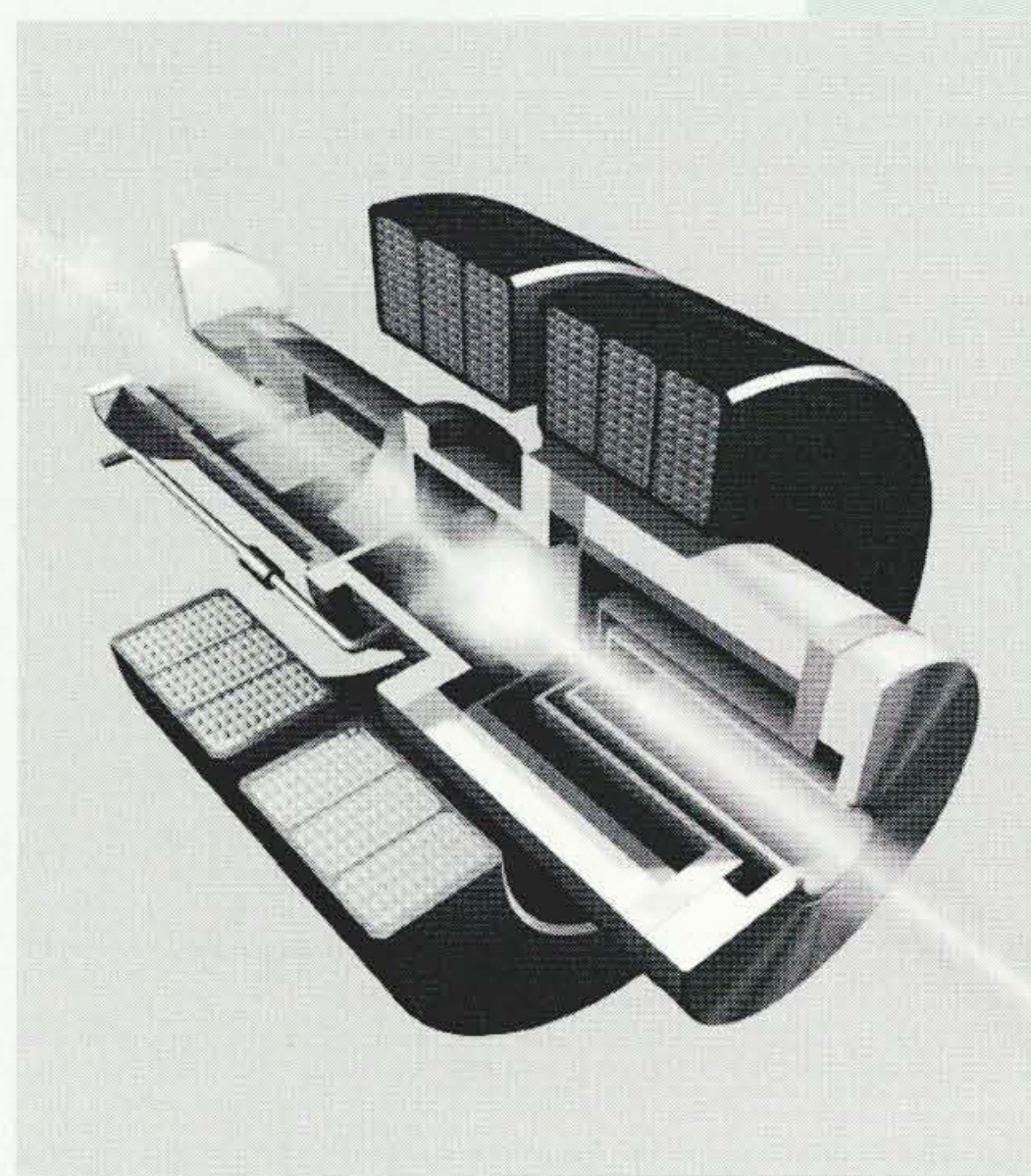
吉川 昭 Akira Yoshikawa

米良和夫 Kazuo Mera

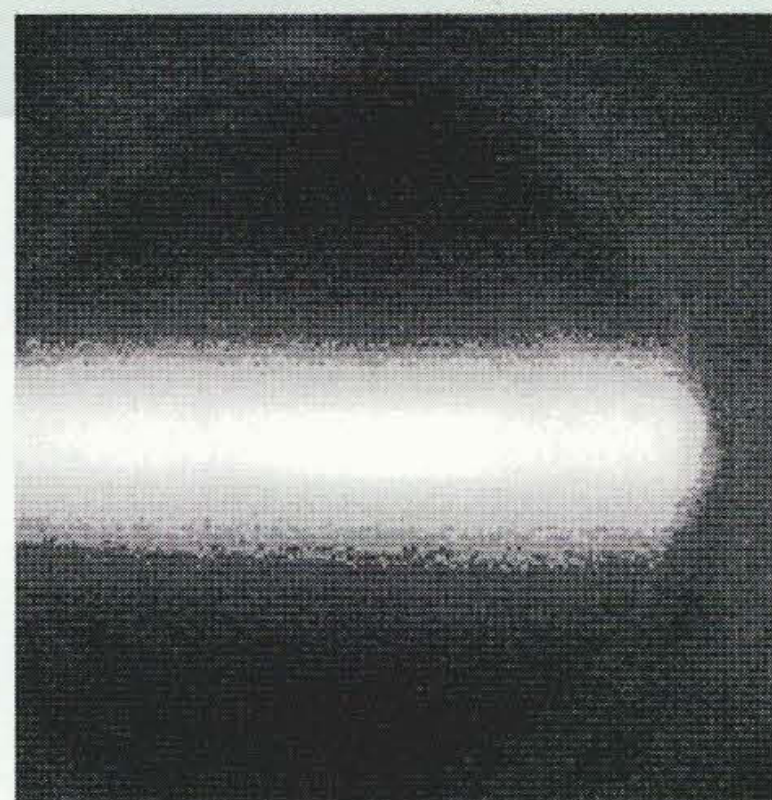
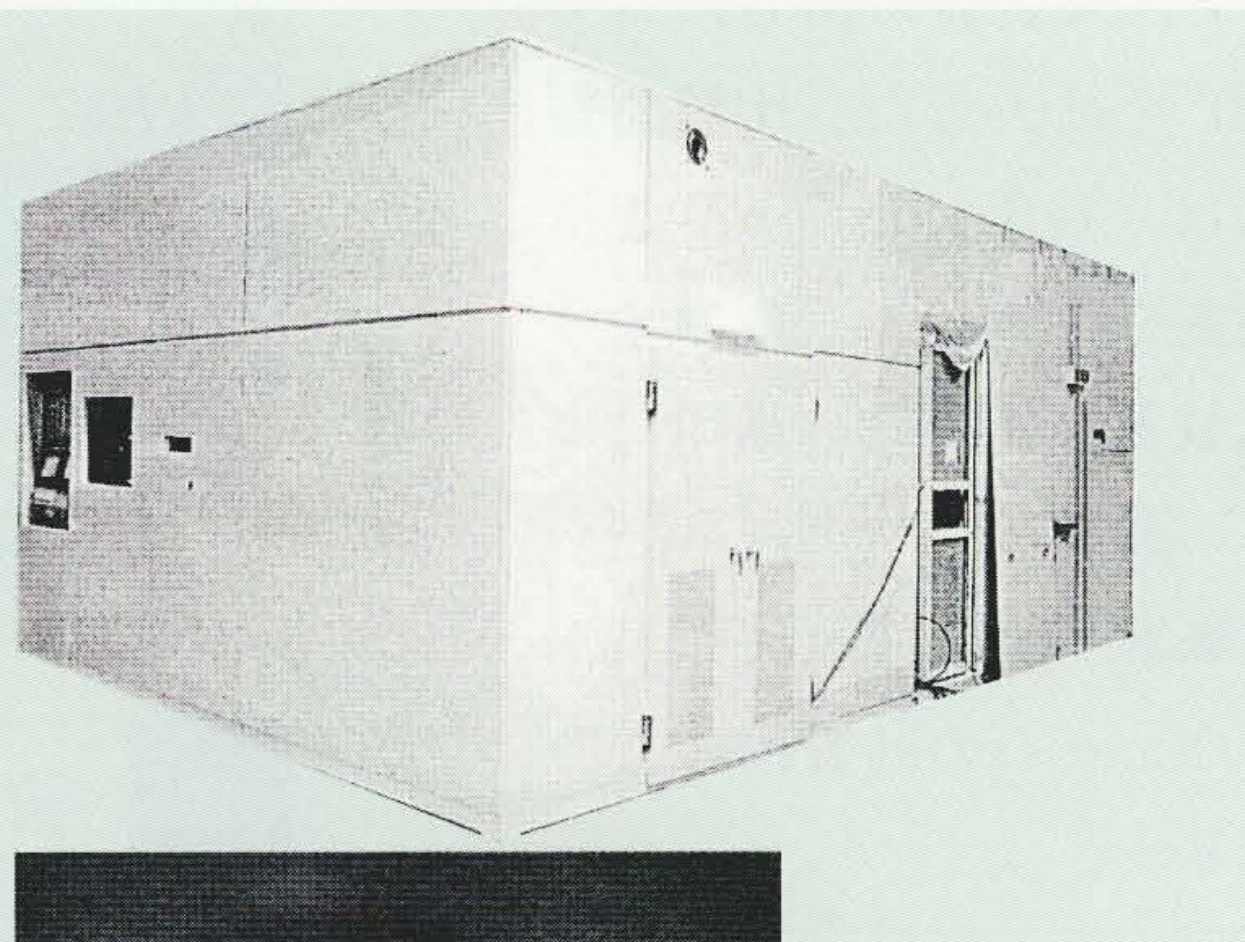
橋本 勲 Isao Hashimoto

登木口克己 Katsumi Tokiguchi

(a) 大電流酸素イオン注入装置
“UI-5000”の外観



(b) “UI-5000”に搭載したマイクロ波イオン源
の構造断面



(c) イオン源から
出射する酸素
イオンビーム
→ ビーム方向

SIMOX (Separation by Implanted Oxygen) ウェーハの量産を目指す大電流酸素イオン注入装置 “UI-5000”

日立製作所が長年にわたって蓄積したマイクロ波イオン源技術を活用することにより、常用70 mAの酸素イオン注入が可能となった。

LSIの高速・低消費電力化のブレークスルー技術としてSOI (Silicon on Insulator) 技術^{※)}への関心が急速に高まり、製品化を目指した研究開発が、回路設計からデバイス、プロセス、SOI基板技術にわたって広範に展開されはじめた。SOIの有力技術の一つであるSIMOX (Separation by Implanted Oxygen) 技術の実用化のかぎを握るのは、Si中に酸素イオンを注入して埋込酸化膜層を形成する、イオン注入装置の性能である。この装置には、実用的な生産性と、最先端のLSIの製造が可能なウェーハ品質の両方を同時に確保しなければならないという観点から、大電流ビーム(50~100 mA)、高温(~550 $^{\circ}\text{C}$)、均一注入、低コンタミネーション、低パーティクルという、通常のイオン注入の概念を超える性能が要求される。

日立製作所は、マイクロ波イオン源の採用とメカニカルスキャン方式を基本コンセプトとした、SIMOX用大電流酸素イオン注入装置“UI-5000”を開発した。この装置はすでにSIMOXウェーハ生産に適用され、常用電流70 mA、注入均一性 $\pm 2\%$ 以下(膜厚均一性で評価)という良好な性能を実現した。この装置がSIMOXウェーハの本格的量産の駆動力となるものと考えている。

1 はじめに

インターネットをはじめとする情報化の急速な進展に伴い、ネットワーク情報処理装置や高機能携帯端末のいっそうの高性能化が強く望まれている。この要求にこたえるためには、これら装置のキーコンポーネントであるLSI

の高速化と低消費電力化が必須であり、その切り札としてSOI (Silicon on Insulator) 技術に対する関心が急速に高まっている。

SOI基板の作製法は、多様な研究を経て今日ではSIMOX (Separation by Implanted Oxygen) 技術¹⁾と、基板はり合わせ技術に集約されてきた。SIMOX技術は、

※) SOI技術：絶縁膜上に形成した薄いシリコン層をデバイス領域として用いる半導体技術であり、高速化、低消費電力化、高集積化に有利である。SOIウェーハは通常、表面単結晶層、埋込酸化膜層、Si基板の3層構成になっ

ている。CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) への適用を想定すると、表面単結晶層の膜厚は50~200 nmと薄く、かつ均一であることが必要である。

Si基板への酸素イオン注入とそれに続く高温熱処理により、基板表面に薄い単結晶Si層(SOI層)を保持したまま、表面からの定められた深さに埋込酸化膜層(Buried Oxide Layer: BOX層)を形成し、SOI構造とする技術である。

日立製作所は、顧客からの要望にこたえる形で1993年にSIMOX基板製作専用のイオン注入装置の開発に着手し、1995年7月に1号機“UI-5000”を納入した。比較的短期間での製品化を可能としたのは、長年にわたって蓄積してきたマイクロ波イオン源技術や高電圧・大電流イオンビーム技術、汎用イオン注入装置技術などの活用によるところが多い。

ここでは、SIMOX用大電流酸素イオン注入装置“UI-5000”の特徴と構成、製作したウェーハの品質、および今後の開発の方向について述べる。

2 装置への要求条件

SIMOX用イオン注入装置への要求条件は、以下のとおりである。

(1) 生産性の確保

必要なドーズ量(ウェーハに注入する単位面積当たりのイオンの個数)は、「低ドーズ」条件で約 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ であり、通常の半導体の不純物注入に比べて2, 3けた多い。基板の生産性の実用的な目標は、年間1台当たり2~3万枚(200 mm径)が目安となる。これは、毎時2.7~4枚のスループットに相当する。このような高ドーズの注入では、スループットは大部分が注入時間で決まる。高スループット化にはイオンビームの大電流化が不可欠であり、注入電流としては少なくとも常用50 mA以上、最大100 mAが必要となる。

(2) 注入品質の確保

(a) 基板加熱: Si表面の単結晶性を維持するには、基板を高温(約550 °C)に保ちながら注入する「ホットイオン注入」が不可欠である。

(b) 均一性: デバイス製作上の要求から、SOI層やBOX層には高い膜厚均一性が求められる。ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)の要求値は $\pm 5\%$ であるが、最近の市場要求は、 $\pm 2\%$ とさらに厳しい。注入均一性の目標は、これらの値と同程度となる。

(c) コンタミネーションとパーティクル: イオン注入装置に共通の課題であるが、SIMOXの場合には、通常の不純物注入に比べて注入時間が10~100倍長いので、装置への要求としては厳しいものになる。

表1 “UI-5000”の主な仕様

装置に求められる生産性と注入品質の確保に合わせて仕様を決定した。

項 目	仕 様
注入エネルギー	80~200 keV
注入電流	常用: 70 mA(180 keV) 最大: 100 mA(200 keV)
ウェーハ温度	550 $\pm$ 50 °C
注入角度	0~14°
注入量均一性	3%以下(σ)
メタルコンタミネーション	10 ¹⁰ cm ⁻² ・台
ディスク上ウェーハ装てん枚数	13(200 mm径), 17(150 mm径)

上記の要求条件に基づいて定めた仕様の概要を表1に示す。

3 設計コンセプトと装置構成

3.1 基本コンセプト

上記の要求条件や仕様を装置として具現化するうえでまず重要となるのは、大電流化を可能とする「イオン源の選定」と、大電流・均一注入に適した「走査方式の選択」である。コンタミネーションやパーティクルについては、その発生を徹底的に排除するためのきめ細かい対処が求められる。

イオン源としては、フィラメントなどの損耗部分がなく、酸素のような活性イオンに用いても長寿命である「マイクロ波イオン源」が適している。日立製作所は、マイクロ波イオン源についての豊富な技術を蓄積しており、これを活用することにより、大電流酸素イオンビーム用に適切化した設計を施し、“UI-5000”に搭載した。

走査方式としては、ビームを固定して基板側を走査する「メカニカルスキャン方式」を選択した。これは、ビームプロファイルが一定していることから、注入均一性やコンタミネーションの低減に有利だからである。

イオン源や走査方式を含めたこの装置の特徴的な設計コンセプトを表2に示す。同表にあげたV字形ビームダンブや電源高速遮断の技術は、核融合炉の中性粒子入射装置に適用した技術を活用したものである。前者は、スパッタ粒子を飛散させることなく大電流ビームを受けたり、計測するのに適する。後者は、放電によるブレイクダウン発生時に、イオンビームがビームライン内壁をスパッタし、ウェーハへのメタルコンタミネーションが増大することを避ける。

3.2 装置構成²⁾

装置構成の概要を図1に示す。イオン源から引き出されたイオンビームは、(1)質量分離器で¹⁶O⁺が分離、選

表2 “UI-5000”の設計コンセプト
要求性能の実現に向けた装置設計上の特徴的な項目と手段を示す。

項 目		実 現 手 段
高生産性		イオンビーム大電流化→マイクロ波イオン源の採用
高品質	加熱注入	ランプヒータ加熱方式
	高均一注入	メカニカルスキャン方式の採用
		スキャン速度の精密制御
		ビーム位置・形状の安定化
		ウェーハ温度制御と均一加熱
	低コンタミネーション・低パーティクル	ビームライン内壁のSiによるカバー
		ウェーハ周辺の中空化
		V字形ビームダンプ
		電源の高速遮断
		後段加速後のビーム偏向
		ウェーハホルダ形状の適切化と材料限定(Si, SiO ₂ だけ)

択され、(2) 後段加速管で所定のエネルギーまで加速され、(3) 四重極レンズでビーム整形の後、(4) 30° 偏向器で中性粒子や汚染イオン種が除去され、(5) ウェーハに入射する。

通常の運転では、イオン源からの引き出し電圧を50 kV付近に固定し、後段加速によって所定のエネルギーまで加速する。後段加速電圧は30～150 kVの範囲で可変としており、したがって、最終の注入電圧は80～200 kVである。なお、標準的な加速電圧は180 kVである。

処理はバッチ方式で行い、ウェーハは、回転ディスク上に円周に沿って配置される。最高500 r/minで回転ディスクを回転させながらビームに対して機械走査(最高0.4 Hz)を加え、ウェーハ全面にビームを照射する。走査速度は、ディスクの回転中心からビーム中心までの距離に反比例するように制御し、注入均一性を向上させる。

ドーズ量については、ビーム電流を常時測定し、その積分値で正確に制御する。ウェーハ加熱は、ウェーハに対向してエンドステーション壁面に設置したランプヒータで行う。装置はカセット ツー カセット方式であり、完全自動運転が可能である。

4 装置性能とウェーハ品質

この装置に期待されるのは、生産性と品質の同時確保である。生産性確保には、注入電流の大電流化が最も重要である。したがって、所定の注入電流が得られるか否かが装置性能の主要点となる。一方、注入品質は表2に示した装置設計上の多様なアプローチが総合化された性能と見なすことができるので、以下では、装置各部の性能の記述に代えて、注入ウェーハの評価データについて述べる。

4.1 注入電流とイオン源の特性

注入電流の実測値を図2に示す。常用電流値である70 mAは安定に得られ、装置仕様の最大100 mAの注入電流も確認した。また、イオン源単体の長時間動作試験では、120時間にわたって安定した引き出し電流が得られ、生産装置として安定な長時間稼動の見通しを得た²⁾。

4.2 ウェーハ品質

“UI-5000”で作製したSIMOXウェーハの品質評価データを表3に示す。埋込酸化膜のリーク欠陥である「BOX欠陥」数を除いては、現段階での要求レベルを満たしている。BOX欠陥の主な成因は付着パーティクルによる注入イオンの遮へいと考えられ、この低減が今後の重要課題である。

SIMOXの特徴は、製作工程が簡単なことに加えて、SOI層やBOX層の膜厚がイオン注入のドーズ量やエネルギーといった制御性の良い因子で規定されるため、本質

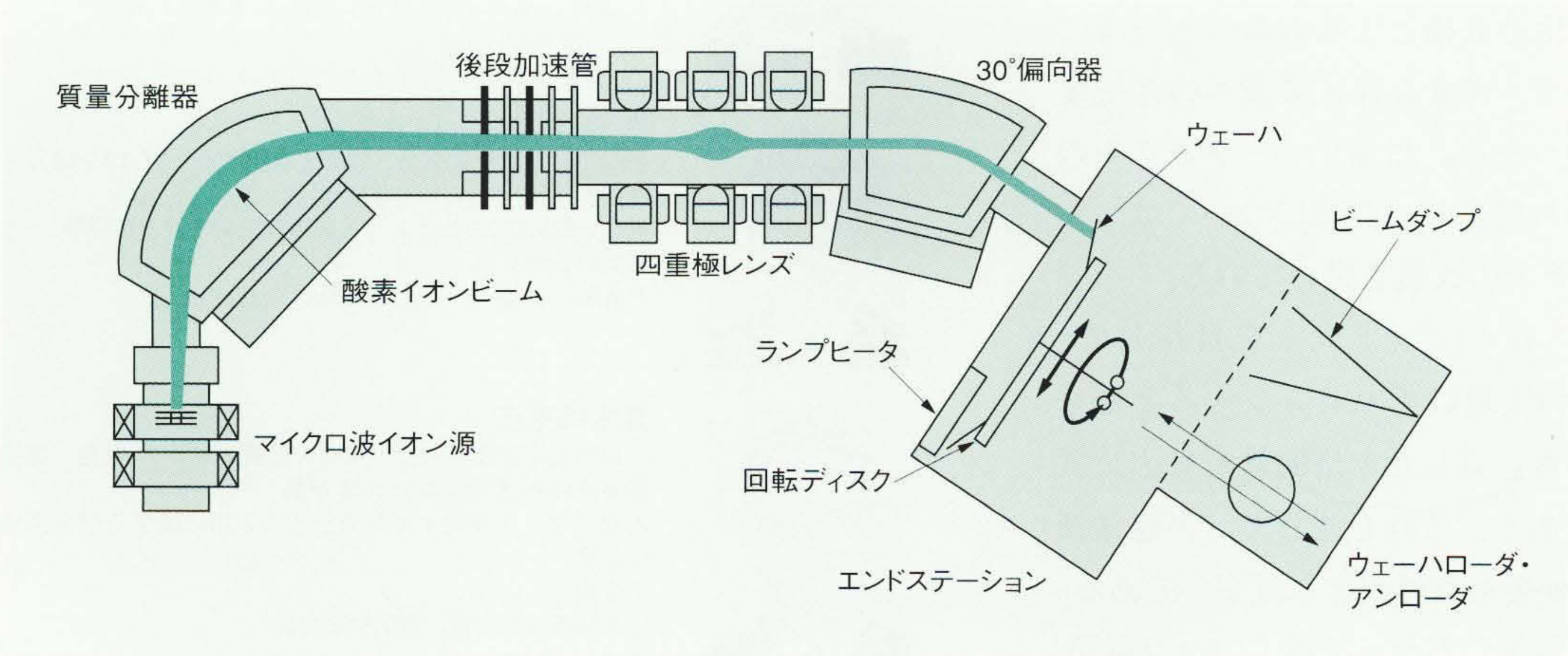


図1 “UI-5000”の構成
ビームの大きさはウェーハ上で約40×100 mmである。

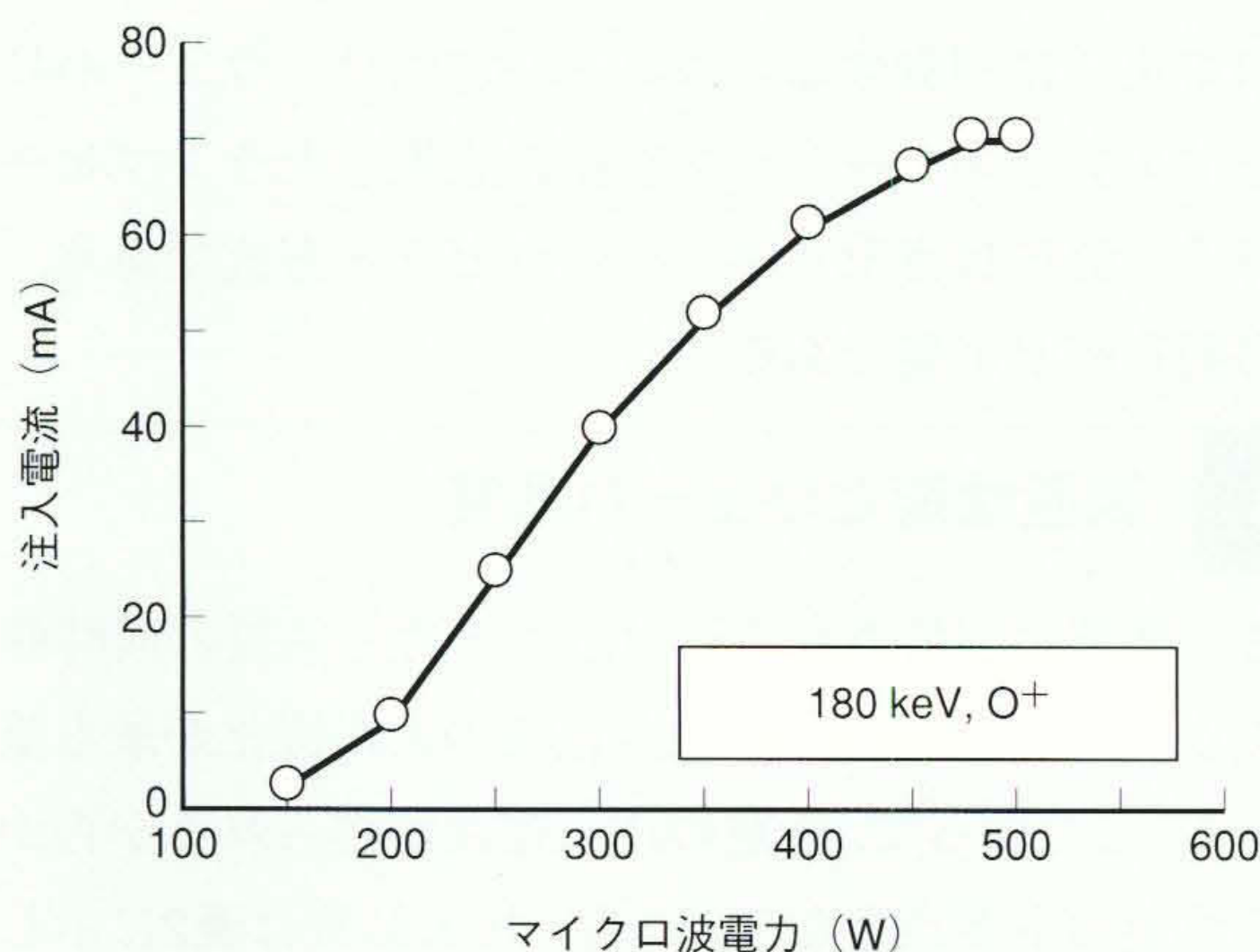


図2 イオン注入電流のマイクロ波電力依存性
500 W印加で常用電流値の70 mAが得られる。

的に膜厚均一性が良いことがあげられる。“UI-5000”では、さらに、ディスクの機械走査速度の精密制御や走査幅の適切な設定、ビーム形状の安定化、ウェーハの均一加熱などにより、200 mm径ウェーハでSOI層とBOX層ともに±2%以下の均一性を達成している。

メタルコンタミネーションは、低ドーズ条件で注入したままの状態、Cr, Fe, Ni, Cuの濃度はすべて $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 以下、さらに、洗浄、熱処理を施して完成したSIMOXウェーハでは 10^{10} cm^{-2} 以下であり、問題のないレベルであることを確認している。

5 おわりに

ここでは、SIMOX用大電流酸素イオン注入装置“UI-5000”について述べた。

“UI-5000”はすでに製品生産に適用され、おおむね所期の目標を達成した。しかし、開発着手時に比べてSOIを取り巻く状況は一変し、ウェーハ品質や価格への要求は、SOIデバイスの製品化を前提とするものへと明確に変ぼうした。これを受けて、イオン注入装置への性能要求も急激に厳しくなりつつある。当面、パーティクルのいっそうの低減が求められており、これについては、すでにさまざまなアプローチでの改良を進めている。

今後は、いっそうのスループット向上を目指して、100 mA以上の常用電流の実現にチャレンジするとともに、稼働率や操作性までも意識した本格的量産対応装置の開発に取り組む考えである。これを通して、半導体技術の大きな変革にいささかでも貢献できれば幸いである。

終わりに、この論文の執筆にあたっては、コマツ電子

表3 “UI-5000”で製作したSIMOXウェーハの品質

埋込酸化膜の「BOX欠陥」の数を除いては、現段階での要求レベルを満たしている。

項目	品質	要求レベル*
SOI膜厚均一性 (SOI膜厚: 60~200 nm)	$\leq \pm 2 \text{ nm}$ (200 mm径)	$\pm 5\%$
BOX膜厚均一性 (BOX膜厚: ~100 nm)	$\leq \pm 2 \text{ nm}$ (200 mm径)	$\pm 5\%$
メタルコンタミネーション	$\leq 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	$\leq 1.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$
BOX欠陥数	0.5~2.0個/ cm^2	$\leq 0.12 \text{ 個}/\text{cm}^2$

注: * 1998年のITRSでの180 nm技術に対する値

データ提供: コマツ電子金属株式会社, 新日本製鐵株式会社

金属株式会社および新日本製鐵株式会社の関係各位から、資料提供とご指導をいただいた。また、大阪府立大学先端科学研究所の泉勝俊教授(前日本電信電話株式会社 主席研究員)からは、この装置の開発と製品化について種々有益な助言をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) K. Izumi, et al.: CMOS Devices Fabricated on Buried SiO₂ Layers Formed by Oxygen Implantation into Silicon, Electron. Lett., 14, 18, 593-594(1978)
- 2) K. Tokiguchi, et al.: Advanced Microwave Ion Source for 100mA-class SIMOX Ion Implantation, Proc. of the 11th Int'l Conf. on Ion Implantation Technology IIT '96, Austin, TX(1996), 1, 287-290(1996)

執筆者紹介



吉川 昭

1991年日立製作所入社、電力・電機グループ 半導体製造装置推進本部 所属
現在、半導体製造装置の開発企画に従事
応用物理学会会員、日本物理学会会員、電気学会会員
E-mail: yoshika @ cm. head. hitachi. co. jp



橋本 勲

1960年日立製作所入社、電力・電機グループ 国分電力・電機本部 ビーム応用装置部 所属
現在、イオンビーム関連製品の設計、開発に従事
電気学会会員
E-mail: i-hashimoto @ cm. kokubu. hitachi. co. jp



米良 和夫

1981年日立製作所入社、電力・電機グループ 国分電力・電機本部 ビーム応用装置部 所属
現在、SIMOX用イオン注入装置の開発・設計に従事
電気学会会員
E-mail: k-mera @ cm. kokubu. hitachi. co. jp



登木口克己

1971年日立製作所入社、電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 電機システム部 所属
現在、マイクロ波イオン源とその応用に関する研究開発に従事
工学博士
応用物理学会会員、電気学会会員
E-mail: ktokigu @ erl. hitachi. co. jp